Baitcasting Reelの閉ループ制御技術

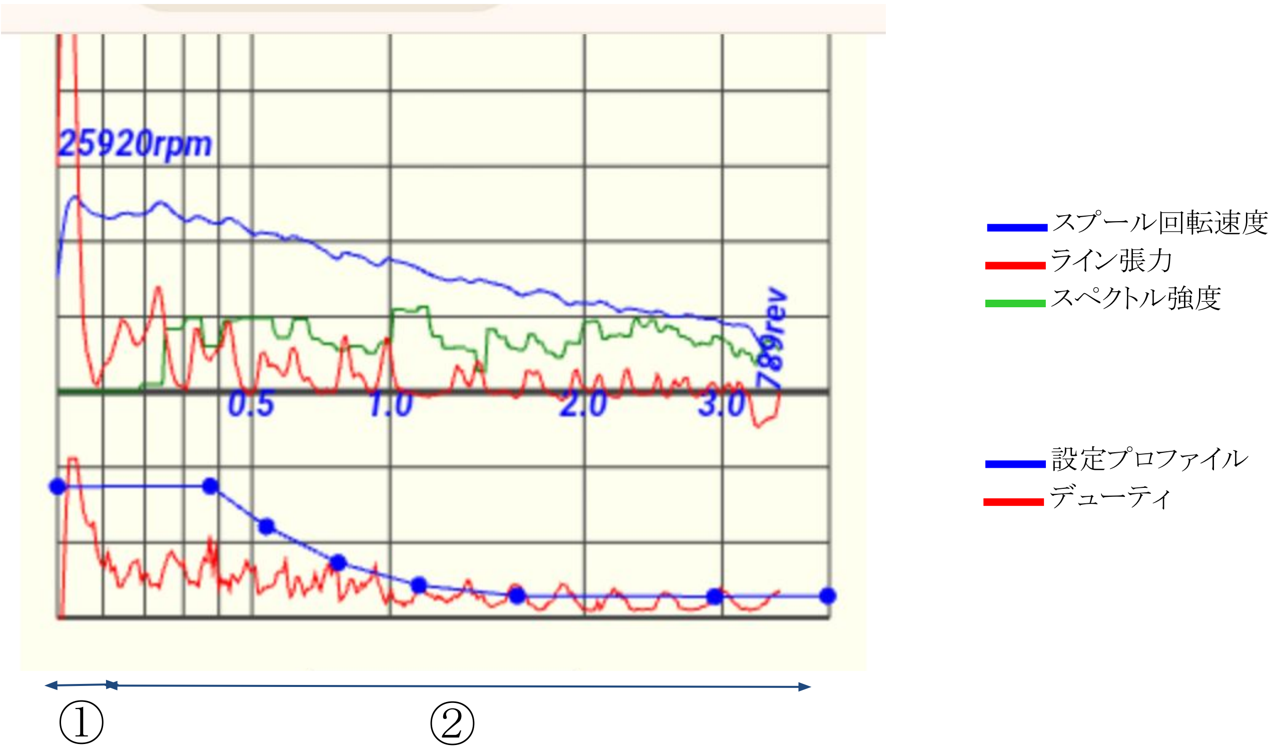
本レポートは、ライン張力の閉ループ制御による、Baitcasting Reelのブレーキ制御技術について解説している。ライン張力の閉ループ制御は、今年になり、メカ方式のものがいくつか製品化された。しかしながら、閉ループ制御の障害となっている、以下２点の課題については、解決されたとは言えない。
ひとつは、この対象系はダンサーローラのない張力制御系であるため、懸垂線特性から来る張力の極端な非線形性に対して、閉ループ系が破綻しないこと。もうひとつは、制御する張力が微小レンジ(0.1N以下)であるため、検出誤差(零点ズレ)の影響を受けないようにすること、である。
これらについては、従来の電子制御方式も不完全であり、モード選択SWでの制御切り替えなしには成立していない。
本技術は、この課題を克服し、ライン張力の閉ループ制御による、完全自動のブレーキ制御を提供するものである。

2025/10 C.A.技術研究所

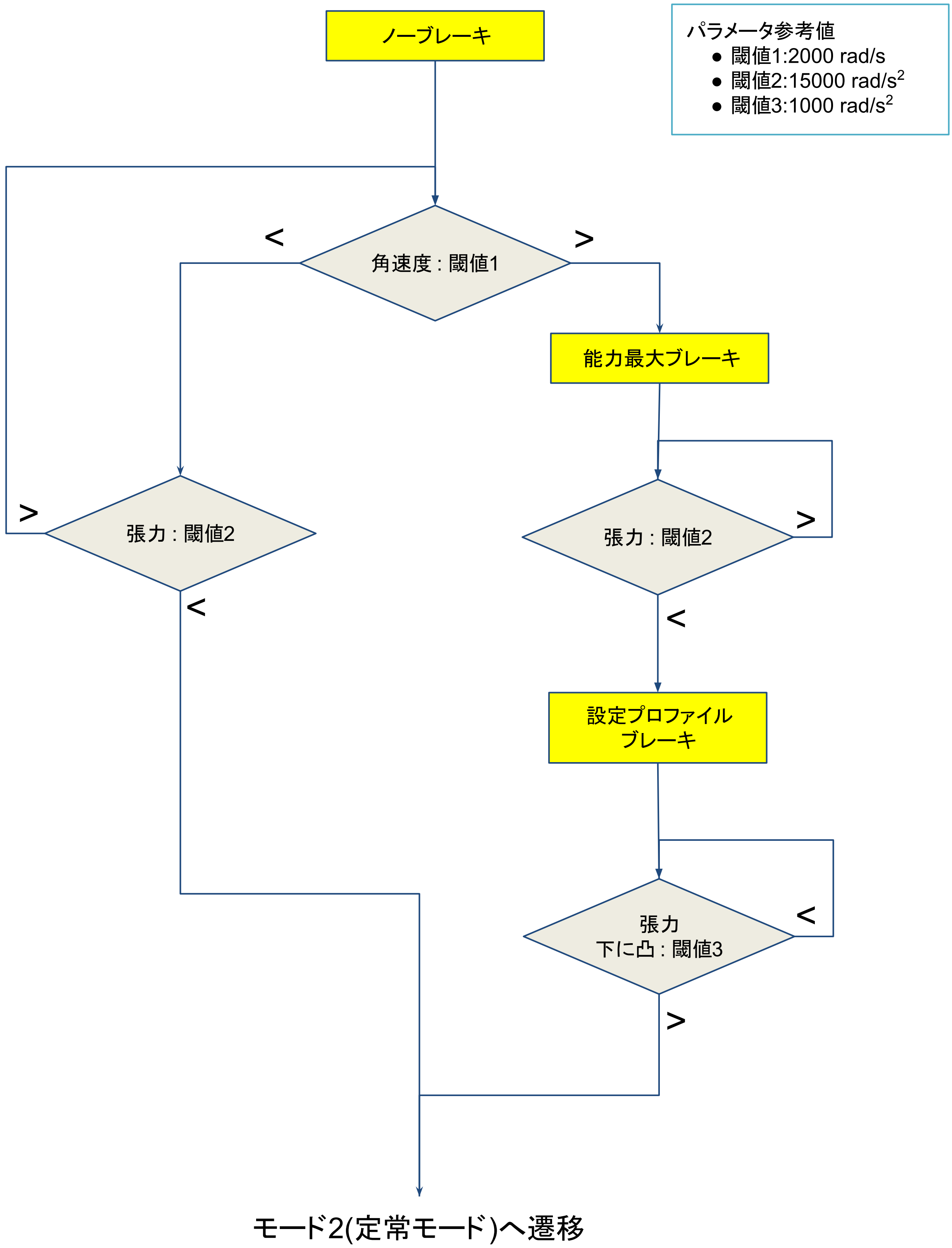
制御モード

以下の2状態で制御構造を切り替える

1. 加速モード
2. 定常モード



加速モード


パラメータ参考値
● 閾値1:2000 rad/s
● 閾値2:15000 rad/s2
● 閾値3:1000 rad/s2
ノーブレーキ
角速度：閾値1
<
>
能力最大ブレーキ
張力：閾値2
>
<
張力：閾値2
>
<
設定プロファイルブレーキ
張力
下に凸：閾値3
<
>
モード2(定常モード)へ遷移

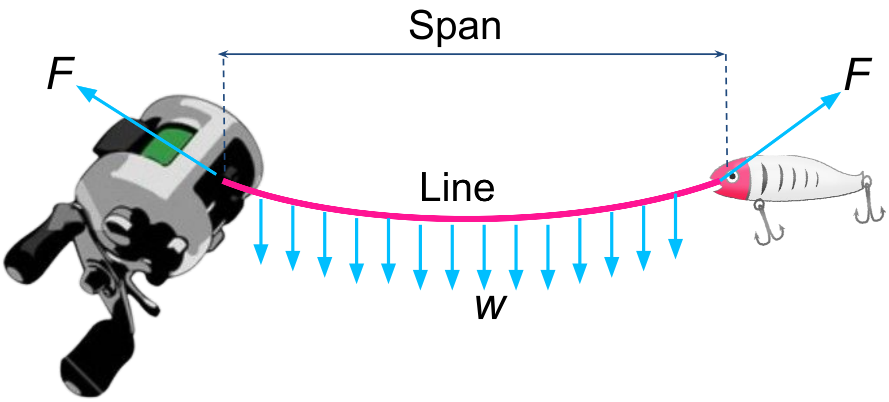
定常モード1/3

ロッドによる加速力が無くなった後は、リール -ライン-ルアー系から成る、定常状態に移行する。

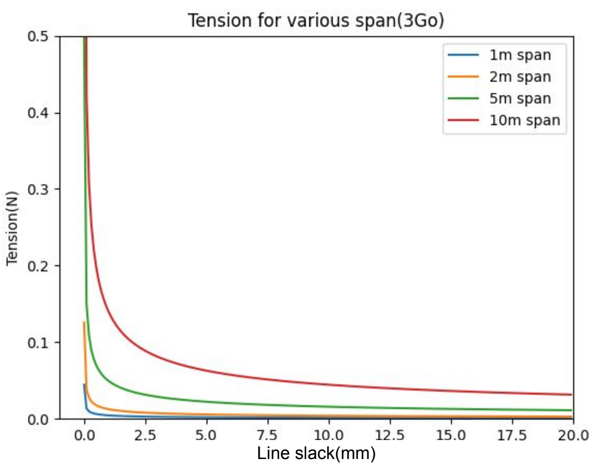
設計に際しては、以下の点を考慮すること
- ●系の非線形性
- ●張力零点ズレ

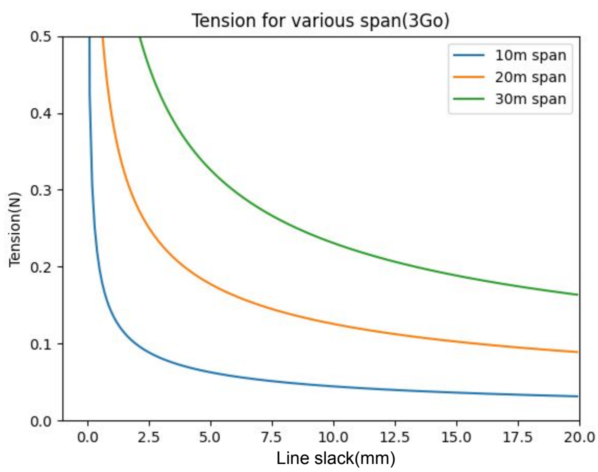
❏ 系の非線形性問題

この系の静力学的な力のつりあいは、下図のように懸垂線を描くラインの重量*W*と、張力*F*がつりあっている。



懸垂線問題は1690年にホイヘンスによって解明された。スラック(Line slack)を、ライン長とスパン(Span)の差と定義すると、スラックと張力の関係は下図のようになり、非線形性が極めて大きいことがわかる。





定常モード2/3

系の非線形性を踏まえて、以下のようにゾーンごとの設計を行う

[A]スパン大(>10m)ゾーン

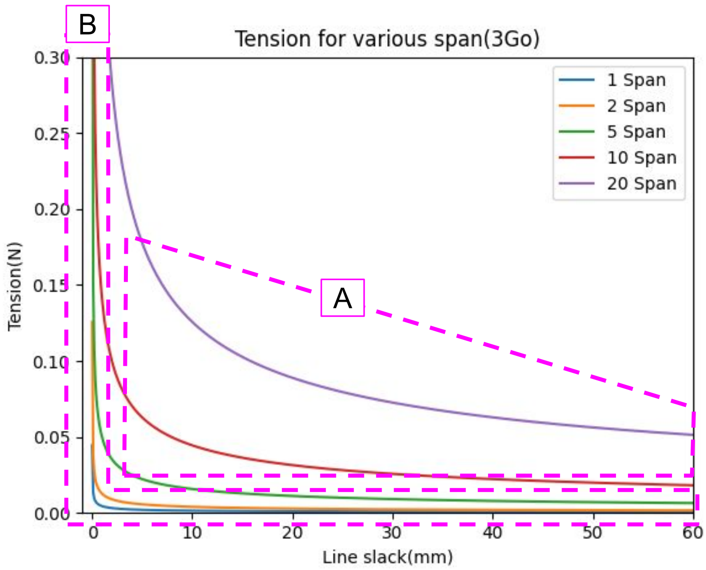
張力とスラックがリニア関係にあり、連続制御(PID制御)が適用可能なゾーン。
ただし

- 張力零点ズレ対策
- ゾーン左方の非線形性補償

が必要。

[B]スパン小(<10m)ゾーン

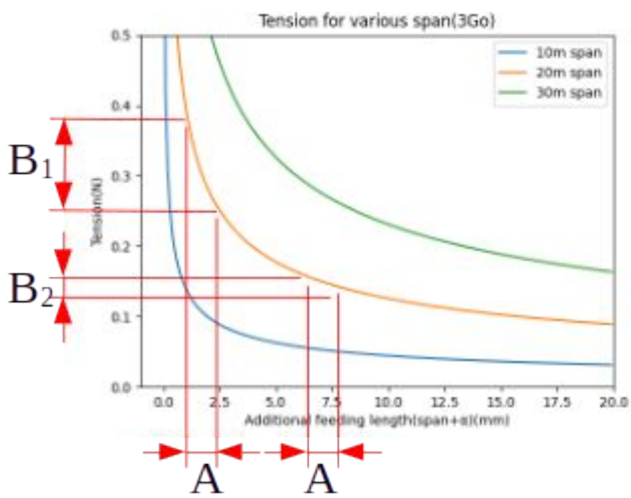
張力が0／100で変動し、連続制御が破綻するゾーン。不連続制御でカバーする。



❏ 張力零点ズレ問題

張力はオブザーバにより推定するため、パラメータ誤差が推定値の誤差となる。定常状態では、0.1N以下の微小値の制御となるため、零点ズレの制御への影響が大きい。

この問題の対策として、下図のように、スラックー張力関係の非線形性を利用して、張力の変動にて張力の代換えを行う。

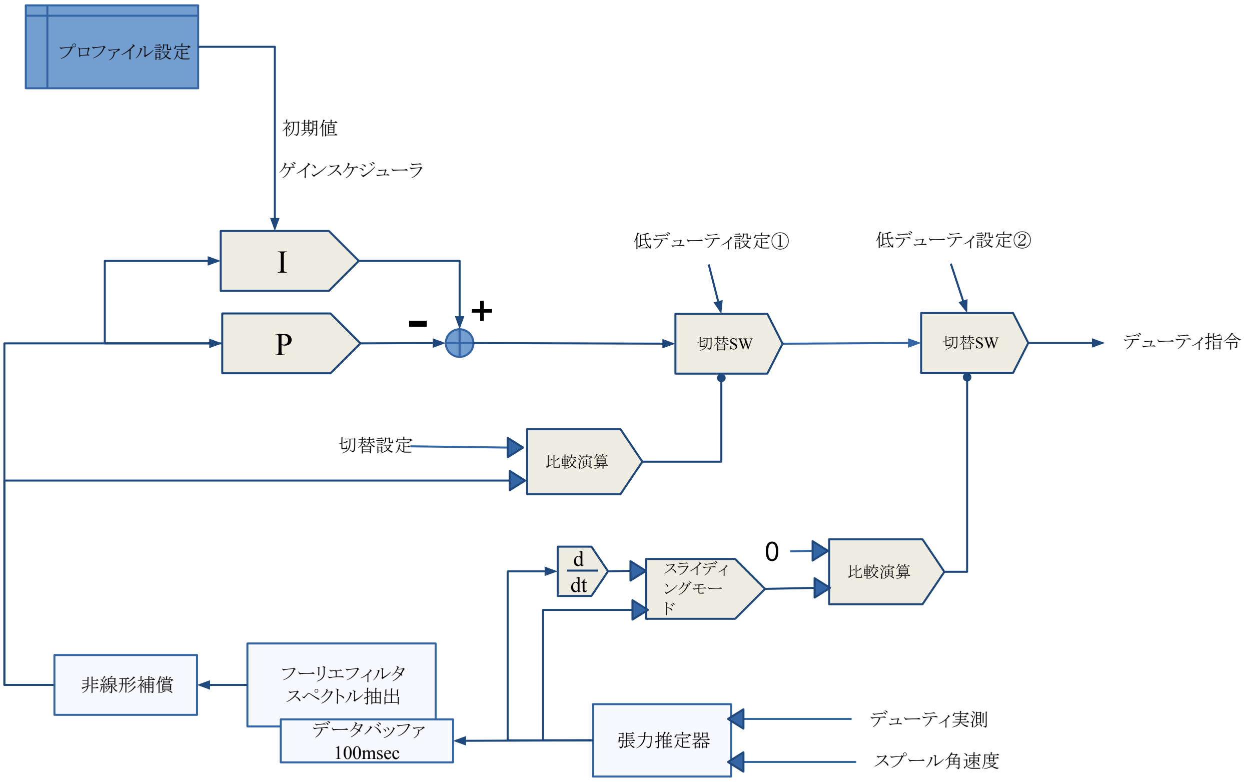


非線形性により、同じ入力変動(A)に対して、張力変動は、張力の大きさによって変化する(B_1B_2)

定常モード3/3

❏ ブロック図

以上を踏まえて以下の制御構造を提示する。



フーリエフィルタ1/2

- 複素フーリエ変換

　振動強度を得るには、周波数スペクトルから特定の周波数範囲を切り出す方法が一般的である。またスペクトルを求めるにはFFTが一般的であるが、本件については、サンプリング間隔が回転速度で変わるため、FFTが適用しにくい。
　このため以下のフーリエ級数公式をそのまま計算する。

$$C(k) = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)e^{2\pi i \frac{t}{T}k}dt$$

- バッファリングと離散化

　周波数分析の対象となるデータ*f(t)*は、最新データから遡って***T***時間分である。この間のデータをバッファリングし、以下の離散化したフーリエ級数を求める。

$$C(k) = \frac{1}{N}\sum_0^N f(n)e^{2\pi i \frac{n}{N}k}$$

パラメータ参考値
- *k*:1.2
- *T*:0.07sec

- 特定スペクトル強度

　フィードバックには、必要な周波数付近の*k*(分周)値を指定して得られた、特定スペクトルC(k)を使う。*C(k)*の絶対値がスペクトル強度となる。

スペクトル(*k*)強度 = |*C(k)*|

フーリエフィルタ2/2

- ❏ 非線形性補償
  スラック-張力の非線形性は、以下のフィルタにて補償する

$$Cs(k) = \frac{\alpha_s}{\max f(n) - \min f(n) + \alpha_s} C(k)$$

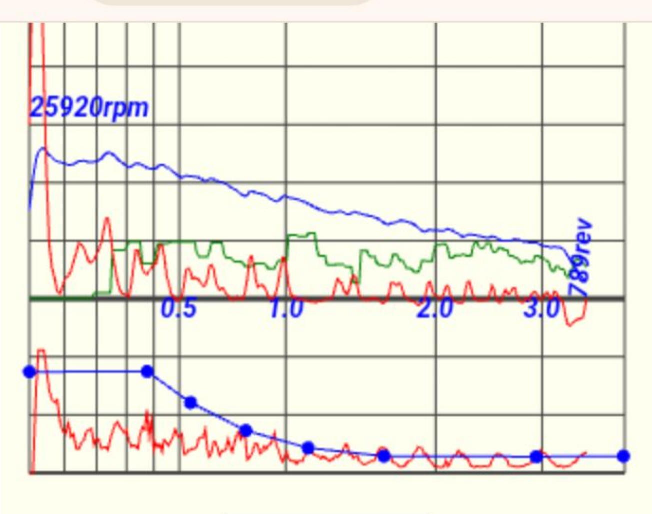
パラメータ参考値
- f_s:250rad/s^2

その他知見

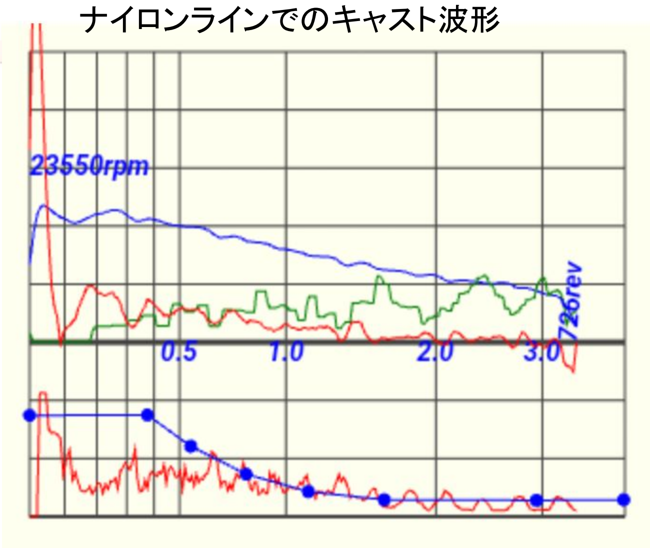
- ライン物性の影響

　ラインの種類の違いにより、張力振幅は下図のようにかなり異なる。ナイロンのような柔らかいラインでは、張力振幅はかなり抑制されるが、周波数領域なら差が小さい。

PEラインでのキャスト波形



ナイロンラインでのキャスト波形



- 次の回転検出時間予測

　センサーレスユニットの場合は、次の周期を予測し、その前にターンオフする必要あり。下記の回転予測時間 Δt_1を求め、最大でもその6/7以下のターンオン時間とする。

$$\Delta t_1 = \frac{v_0 - v_0\sqrt{}(1 + \frac{2\alpha d_0}{v_0^2})}{\alpha}$$

$$\alpha = -\Delta t_0 + \Delta t_{-1}$$

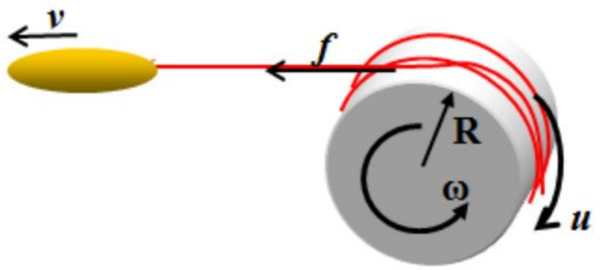
$$v_0 = -\Delta t_0 \Delta t_0 + \Delta t_{-1}\Delta t_{-1} + 2\Delta t_0 \Delta t_{-1}$$

$$d_0 = \Delta t_0 \Delta t_{-1}(\Delta t_0 + \Delta t_{-1})$$

近似式　$\Delta t_1 = \dfrac{d_0}{v_0} - \dfrac{\alpha d_0^2}{4v_0^3}$

❑ 張力推定器

張力はオブザーバにて推定する



モデル

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{R}{J} f - \frac{1}{J} u \\ \dot{f} = 0 \end{cases}$$

ここでuはブレーキトルク、Jはスプールの慣性モーメント、Rはスプール半径である。

状態変数をω, fとしたとき、この系に対する同一次元オブザーバは以下のようになる。

$$\begin{cases} \dot{\varpi} = -2\lambda(\varpi - \omega) + \frac{R}{J}\hat{f} - \frac{1}{J}u \\ \dot{\hat{f}} = -\lambda^2 \frac{J}{R}(\varpi - \omega) \end{cases}$$

$\varpi, \hat{f}$は、それぞれω, f;の推定値である。

❑ スライディングモード

On/Off制御の一般化であり、多変数の制御にも対応できる。下図のように位相平面を単純に直線σで分割し、ローカスがその線のどちら側にあるかによって、制御入力を二値に切り替える。